

無拘束なインタフェースを目指した風圧による力覚提示方式

鈴木 由里子[†] 小林 稔[†] 石橋 聡[†]

VR 技術などの新しい技術をもとに日常生活に用いる道具を実現していく取り組みにおいては、道具が利用者を拘束しないようにすることが大切である。本論文では、ヒューマンインタフェースを“無拘束化”する試みについて述べる。特に、利用者との物理的接触を必要とするために、これまで無拘束化が困難と考えられていた力覚提示を対象に、その無拘束化を実現する方法について提案する。提案手法では、利用者の身体や所持物に風圧を与えることで、利用者に力覚を提示する。本方式の力覚提示装置によれば、利用者は装置に拘束されることなく、自由に動くことができる。本稿では、風圧による力覚提示の方法について述べ、システムの実装、および風圧による豊かな力覚表現の検討について述べる。

Design of Air Pressure Based Force Display toward Untethered Human Interface

YURIKO SUZUKI,[†] MINORU KOBAYASHI[†] and SATOSHI ISHIBASHI[†]

In order to apply VR technologies to tools for everyday life, it is necessary to develop untethered human interface technologies that never constrain users' activities. This paper focuses on force feedback interface devices which have been considered to be difficult to make untethered. To achieve this goal, we proposed the force display method that utilizes air pressure to give force sensation to users. This force display does not constrain users' activity, and allows users move freely. This paper introduces the basic idea of the air pressure based force display, describes the implemented system, and discusses the way of controlling air pressure to realize the expressive force display.

1. はじめに：無拘束なインタフェース

近年、人工現実感（VR）の技術が急速に発展する中、VR 技術を実現するための様々な研究が進められている。これらの技術は現状では特殊な環境においてのみ利用可能だが、これら VR 技術を一般の日常生活環境においても利用可能にできれば、利用場が多様化し、より有効な生活の道具となっていくと期待される。

我々は、日常生活で利用する道具に求められるヒューマンインタフェースの要件として、利用者を拘束しない特質（無拘束性）が大切であると考えている。本研究では、この無拘束性の実現を目指している。この特質についてコードレス電話を例に説明する。コードレス電話は、ワイヤレスであるためどこでも利用できるというモバイルの利点とは別に、コード付き電話のように使用中にコードに引っ張られたり、コードが

身体や周囲の物品に絡まったりすることがなく、自由な姿勢で電話をすることができ、電話を持ったまま服を着替えることすらできる。コードレス電話では、据え置き装置とつながっていないことにより物理的・精神的負担が少なくなっている。日常生活の道具としてふさわしい道具を実現していく取り組みにおいては、このような無拘束性は重要な要素であると考えている。

この無拘束性を軸に、現在の VR の装置を考える。多くの VR システムでは、利用者は信号線などのワイヤによって据付の装置とつながれた状態になる必要があったり、重い装置を装着したりする必要がある。このように一般の日常生活の道具に比べて利用者は装置に拘束されてしまう。

VR の装置の開発においても無拘束性の実現を目指した取り組みがなされている。たとえば聴覚についてはヘッドフォンを装着しない立体音場の再生に向けた研究が進んでいる¹⁾。また、視覚については、没入型仮想環境^{2),3)}により、利用者は立体視眼鏡をかけディスプレイで囲まれた空間に入ることによって、自由に動き回りながら仮想空間を観察することができる。またさら

[†] 日本電信電話株式会社 NTT サイバースペース研究所
NTT Cyber Space Laboratories, NTT Corporation

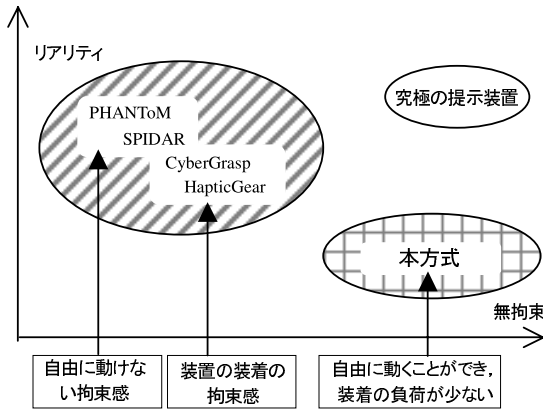


図1 本研究のねらい
Fig. 1 Aim of this research.

に眼鏡なし立体ディスプレイ^{4),5)}などの開発も進んでいる。

仮想空間の物体に触れるための技術である力覚提示装置については、6自由度のマニピュレータを手などで操り、各関節筋の反力を制御して力覚を提示する方式^{6),7)}、糸を張った物体を手を持ち、糸の張力により力覚を提示する方式^{8),9)}、グローブをはめ指の曲げを機械的に制御し、力覚を提示する方式^{10),11)}などが試みられている。しかし、これらの装置を使用する場合、装置を装着するのに時間がかかり、すぐに使用することや止めることができない、または装着する装置が重い、操作部分が据え付けの装置とつながっているため自由に動くことができないなど、利用者を拘束するので、利用者は物理的・精神的負担を強いられる。力覚提示技術においては、力の伝達に利用者装置との物理的接触が本質的に必要であるために無拘束性の実現が困難である。本研究はこの力覚提示技術について、その無拘束化に挑戦する。

我々は、日常生活環境において使いやすい無拘束なインタフェースを目指して、風圧による力覚提示方式を提案している¹²⁾。風を利用した提示方式としては、ファンで構成された装置を利用者が手に持ち、その手に風覚を知覚させる方法が提案されている¹³⁾。この方式は、風を風として提示することで、風の大きさ・方向などの風覚情報を利用者に提示することを目的としたもので、力覚提示を目的としたものではない。これに対し本方式は、風を風として感じさせるのではなく、力を提示する媒体として利用するもので、仮想環境のイベントに合わせて風を制御し、利用者の身体や所持物に取り付けた風受容器(送風装置からの風を受けて、力を与える板)に風圧を与えて力を提示する方式である。本方式の力覚提示装置によれば、従来方式

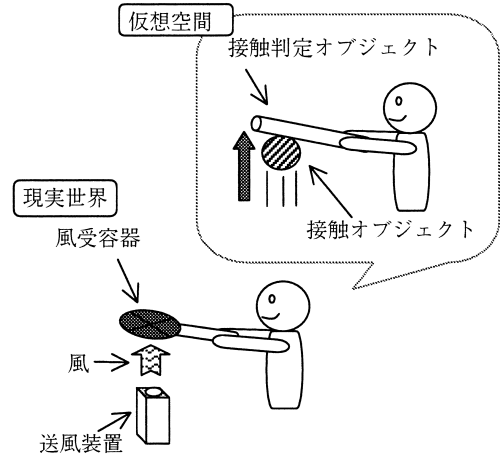


図2 概念図
Fig. 2 Concept.

に比べ、利用者は装置に拘束されることなく、自由に活動することができる(図1)。本論文では、本方式の風圧による力覚提示の方法について述べ、システムの実装、および風圧による豊かな力覚表現の検討について述べる。

2. 風圧による力覚提示方式

仮想空間における風圧による力覚提示の方法について説明する。本方式の概念図を図2に示す。

現実世界において利用者の身体や所持物に、風受容器を取り付ける。仮想空間においては、仮想的な接触を発生させる接触オブジェクトと、接触オブジェクトとの接触を判定する接触判定オブジェクトを用意する。利用者に取り付けた現実世界の風受容器の動き(位置・向き)を計測し、それに応じて仮想空間内の接触判定オブジェクトを動かす。

仮想空間内で接触オブジェクトと接触判定オブジェクトが接触したかを計算する。接触が発生していたら、接触が発生した接触判定オブジェクトに対応している現実世界の風受容器に風圧を与える。以上より、仮想物体に接触すると、風圧により力覚を提示することができる。

なお、風受容器としては、凹形の物体を取り付けることや、操作者の衣服・所持物自体の面を取り付けることが考えられる。

力提示に空気を利用する本方式では、従来方式のようにアームやワイヤにより利用者は装置につながっていないので、利用者は自由に動くことができ、無拘束性を実現できる。

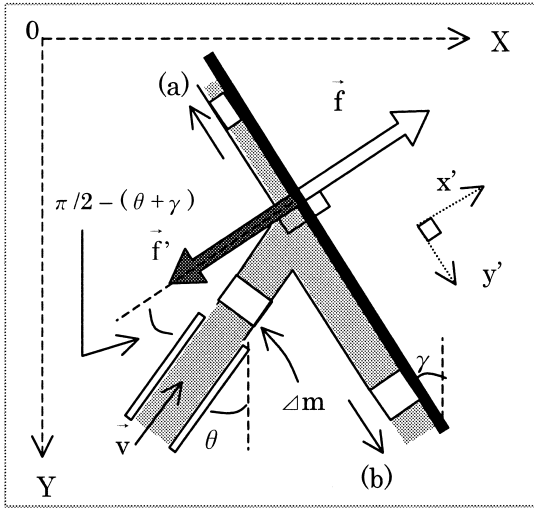


図3 平面に衝突する流体
Fig. 3 Fluid colliding with plane.

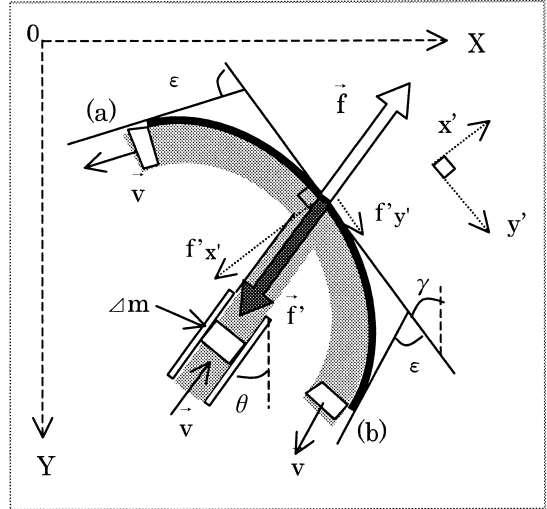


図4 凹凸面に衝突する流体
Fig. 4 Fluid colliding with concave and convex surface.

3. 風圧による力の特性

風圧による力覚提示を実現するため、風圧による力の特性について述べる。

3.1 流体による力覚提示の物理モデル

本方式が、風を風受容器の面で受けとめ、力覚として提示する方式であることから、流体が平面に衝突するときに働く力の物理モデルについて述べる。

図3のような x-y 平面において鉛直面より角度 γ ($0 \leq \gamma \leq \pi$) で固定された滑らかな平面に対して、ノズルから速度 \vec{v} で噴出する流体が角度 θ ($-\pi/2 \leq \theta \leq \pi/2$) で平面に衝突し、2つの流れ (a) および (b) となる場合を考える。

平面は流体より力 \vec{f} を受け、平面が固定されていることから、その力 \vec{f} を反作用の力 \vec{f}' として返す。噴流はその内部のすべての点で静圧が等しく、曲がる際に運動エネルギーの損失がなく、非粘性流体と仮定すると、平面に平行方向のせん断力は作用しない¹⁴⁾。このとき、送風口から Δt 時間噴出する流体の質量を Δm 、流体が発射される速度を v 、送風口の単位時間あたりの流体の質量を Q 、送風口の面積を A 、流体の密度 (単位体積の質量) を ρ とすると、 $\Delta m = Q \cdot \Delta t = \rho A v \cdot \Delta t$ より、平面に対して垂直成分の力 $f'_{x'}$ は、次のように表すことができる。

$$f'_{x'} = \frac{(\Delta m) \cdot v \cdot \sin(\theta + \gamma)}{\Delta t} = \frac{Q^2 \cdot \sin(\theta + \gamma)}{\rho A} \quad (1)$$

式 (1) より、単位時間あたりの流体の質量 Q または

送風口の面積 A を変化させることで、平面に与える力が制御可能であることが分かる。

次に、流体を受ける面が、凹・凸曲面の場合を考える。図4のように角度 γ ($0 \leq \gamma \leq \pi$) の固定された面に流体が衝突し、角度 ϵ ($-\pi/2 \leq \epsilon \leq \pi/2$) で面から流体が出ていく場合の運動を考える。送風口から速度 \vec{v} で噴出する流体が角度 θ ($-\pi/2 \leq \theta \leq \pi/2$) で面に衝突し、2つの流れ (a) および (b) となる。

面は流体より力 \vec{f} を受け、面が固定されていることから、その力を反作用の力 \vec{f}' として返す。噴流は、その内部のすべての点で静圧が等しく、曲がる際に運動エネルギーの損失がないとすれば、(a) および (b) の流体の速度は、 \vec{v} と等しくなる¹⁴⁾。このとき、送風口から Δt 時間噴出する流体の質量を Δm 、流体が発射される速度を v とすると、面に対する垂直成分の力 $f'_{x'}$ は、次のように現すことができる。

$$f'_{x'} = \frac{(\Delta m) \cdot v \cdot (\sin(\theta + \gamma) + \sin(\epsilon))}{\Delta t} \quad (2)$$

式 (2) より ($\epsilon = 0$) のとき流体を受ける面は平面となり、また ($0 < \epsilon \leq \pi/2$) のとき流体を受ける面は凹形となり、その面に受ける力は平面時より大きくなる。また ($-\pi/2 \leq \epsilon < 0$) のとき流体を受ける面は凸形となり、その面に受ける力は凹形面、平面時より小さくなる。このことが分かる。

3.2 風圧による力の特性検証

次に、これまで述べた物理モデルを検証し、構築するシステムを検討するため、実際の風による提示力を計測した。

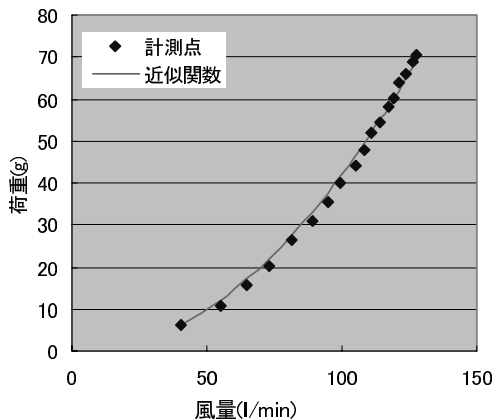


図5 風量に対する荷重変化

Fig. 5 A change of load for the amount of airflow.

検証1：風量の変化による力の変化

式(1)で示した，平面に与える力の制御が可能であることを検証するため，平面に与える力を制御し受ける提示力を計測した．平面に与える力の制御は，前述のモデルより，単位時間あたりの風量や送風口面積を変化させる方法が考えられるが，実現の容易性から，前者により制御することとした．そのために，単位時間あたりに噴出する空気の種類を制御する送風装置を用いた．図5は，ある一定の高さに設置したノズルから，真下の電子秤に向かって空気を一定時間噴出し，その風量を変化させて，秤にかかった荷重を計測した結果である．

なお，風量変化の範囲は，流量計（使用基準0.02 MPa，20°C）で計測可能な範囲，空気を噴出する装置の限界から，約40 (l/min)~約130 (l/min)まで変化させている．

図5より，力の変化が式(1)で示した，風量に対する2次関数曲線 ($y = 0.0043 \times Q^2 + \alpha$) に近似していることが分かる．つまり風量を制御することでおよそその2乗に比例した力が噴出空気を受ける面にかかることが分かる．

なお理想解では風量の2乗に比例する係数が約0.0026 ($A = 2.0$ [mm], $\rho = 0.12$ [kg · s²/m⁴], 25 [°C])となるが，実験では理想解の値より大きい力が出ている．その理由の1つとして，温度，圧力により流体比重量が変化するため，流量計の指示誤差より風量を少なく計測していることが考えられる．

検証2：流体を受ける面の形状に対する力の比較

式(2)で示した，風を受ける面の形に対する風圧から受ける力の違いを検証するため，ある凹形面の受容器の場合と平面の場合において，受ける力の違いを比

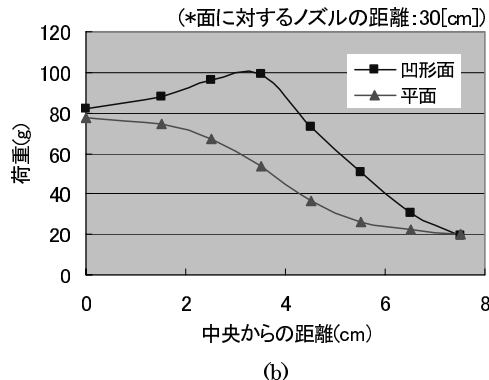
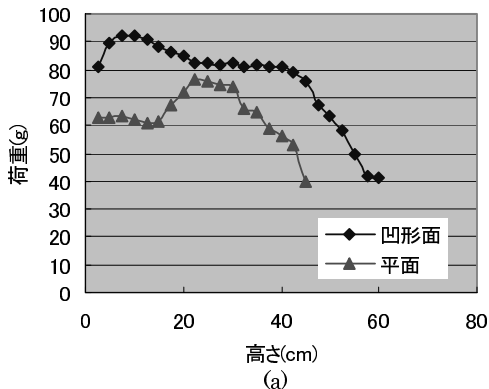


図6 風を受ける面の形状の違いによる荷重比較

Fig. 6 Comparison of receiver's shapes with load.

較する．平面（秤皿を利用：半径6.5 cm）および凹形の物体（半径5.5 cm）の風受容器それぞれに対して，受ける力の違いを計測した．さらに，実際の利用では，利用者の持つ風受容器が必ずしも風を受けるのに適切な位置にこないことも考えられる．そのような状況を想定し，風受容器とノズルとの距離および水平方向での位置関係を変化させ，空気を噴出した場合の荷重の違いを比較した．図6に計測結果を示す．

図6(a)は，高さに応じて受ける力の大きさの変化を，凹形面と平面の風受容器に関して計測したものである．この図より，風受容器が凹形の方が，比較的大きな力を受けていることが分かる．また，風受容器とノズルが近い位置では距離に従い力が一度増加し，さらに離れると徐々に力が減少し，ある距離を境に急激に減少していることが分かる．力覚を提示する距離が変化する場合には，ノズルに対する提示位置に応じて風圧を制御する必要がある．

図6(b)は，噴出する空気があたる位置が中央からずれた場合の力の大きさの変化について示したものである．風受容器が平面の場合は，噴出する空気があたる位置が中央からずれるに従い，受ける力が減少する．

一方、風受容器が凹形面の場合は、噴出する空気があたる位置が中央から側面に近くなるに従い、まず増加し、側面のやや手前を境に減少している。

計器での測定に加えて、実際に平面または凹形面の風受容器それぞれを手に持ち、上方向に噴出した空気を受けたときの力のかかり方を比較した。風受容器が平面の場合は、風があたる位置が風受容器の中心から少しずれると、面を回転させる力を受けるように感じる。一方風受容器が凹形面の場合、噴出した空気を受ける風受容器の位置が少々ずれていても、面を回転させる力がかかりにくかった。この面を回転させる力がかかりにくいと感じる理由として、正確には詳しい解析が必要だが、次のような原因の可能性が考えられる。平面の風受容器の場合は、噴出した空気を受けることによる力のみが面に与える力として働く。一方、凹形面の風受容器の場合は、噴出した空気を受けることによる力とあわせて、流体が両側に分かれ凹形側面から流れ出すことで力が発生し、それらの合力が、面に与える力として働く。噴出した空気を受けることによる力は、位置によって回転モーメントに変わるが、凹形側面から流れ出す流体の合力は、つねに風受容器の両端に力がかかるため両側の均衡を保つ力になる。そのため、全体としては、回転のモーメントの成分が相対的に弱くなると考えられる。

その原理については今後さらなる解析が必要だが、平面に比べ凹形面で風を受けることで、大きな力を受けることだけでなく、提示位置がずれても受ける力の大きさや方向が変化せず意図している力を提示しやすいことも分かった。

4. 実装システム

本方式の実現性を確認するシステムを構築した。風圧による力の制御は、前記の検証方法と同様の風量を制御する方式を採用した。実際には、電圧により風量を制御するエアポンプを用いた。また、風受容器としてはユーザの衣服の面を利用することが最も負荷が少ないが、肌の露出した部分に少しでもあつると、風の感覚と受け取られてしまう可能性が高い。このため、ラケットなどの所持物を利用することとし、その先端に、前記検証2で述べたように、風の提示位置がずれても提示力が変化しにくい凹形の物体を取り付けた。

アプリケーションは、仮想空間内の穴から飛び出したカップをハンマーでたたき、“カップたたき”とした。このカップが接触オブジェクトであり、ハンマーが接触判定オブジェクトである。それらが接触するときに、風圧によってユーザに力覚を提示する。

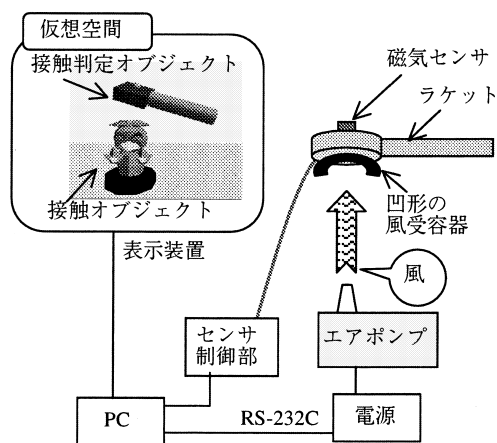


図7 システム構成

Fig. 7 System configuration.

本システムの構成を図7に示す。システムは、風を噴出するエアポンプ、風を受け止める風受容器を取り付けたラケット、ラケットの位置と向きを計測する磁気センサ、システム全体を制御し、センサ情報を基にCGによる仮想空間画像を生成するPC、仮想空間を表示する表示装置から構成されている。仮想空間には、カップとハンマーのCGオブジェクトがあり、実空間のラケットの位置・向きに応じて、仮想空間内のハンマーを動かす。

システム使用開始時に、仮想空間におけるカップが出現する穴の位置を、現実世界におけるノズルの位置に対応させるためキャリブレーションを行う。具体的には、ラケットに取り付けた風受容器をノズル口に接触させ、そのときの風受容器の位置すなわちノズルの位置を記録する。その位置に対応した仮想空間内の座標を、カップが飛び出す穴の座標に設定する。以上によりユーザが仮想空間内で、上下に動くカップの真上にハンマーを位置させたとき、現実空間のラケットの真下にノズルが位置するように設定することができる。

仮想空間内でハンマーとカップが接触したとき、風を発生させる。このときラケットに取り付けた風受容器は、ノズルの真上に位置しているので、風圧がラケットの風受容器に受け止められ力が加わり、ラケットを通してユーザに接触したことを提示する。

本システムを使用している様子を図8に示す。また、使用中の仮想空間と現実空間の対応の様子を図9に示す。

力覚提示だけでなく表示方法も利用者を拘束しないことが求められるため、一般的な平面ディスプレイや、CAVEおよびHMDの没入型ディスプレイを使用し、その使用感を比較した。

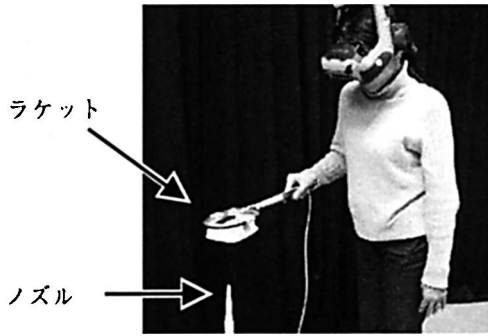


図8 使用している様子
Fig. 8 System in use.

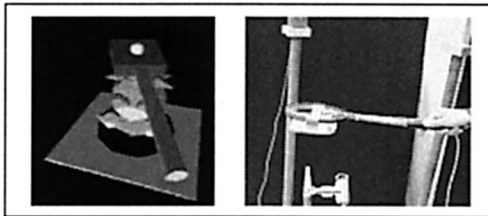


図9 使用中の仮想空間と現実空間
Fig. 9 Virtual and real world in use.

一般的な平面ディスプレイに比べ、CAVE および HMD などの没入型立体ディスプレイに表示することで、仮想接触している位置と風圧による力覚提示位置が近づき、違和感のない直感的な力覚提示が可能となった。

CAVE 版では仮想空間の接触判定オブジェクトであるハンマーを表示せず、現実にも所持しているラケットと、立体視によって浮かび上がったカップが接触したように見える擬似的接触を行った。ただ、実際には仮想空間内のハンマーとの接触によって衝突を判定しているため、磁気センサによる位置の誤差などから、両者の位置関係がずれることがあり、違和感を感じることがあった。このため、仮想空間内のハンマーと現実空間のラケットの位置が、厳密に一致している必要がある。

それに対し HMD 版ではユーザは仮想空間内だけを見るので、仮想空間内に接触判定オブジェクトであるハンマーを表示した。HMD の場合は仮想空間内のハンマーと現実空間のラケットの位置が一致していなくても、違和感を感じなかった。つまり、仮想空間内でハンマーが接触する視覚的な接触位置と、現実にもラケットが提示を受ける力覚提示位置がずれていても、ほとんど違和感を感じなかった。

今後、利用者を拘束しない表示方法と違和感のない力覚提示方法をも、ある程度両立する方法を検討して

いく必要がある。

本システムより、上下に動いている物体を上から叩くことで、下からあがってくる物体との衝突感覚を提示できることを確認した。また使用感として、柔らかい物体との衝突感覚を受けることが分かった。また、使用者からのヒヤリングより“実際に叩いている感じがする”、“ハンマーをカップの穴にかざすと、カップがぶつかってくる感じがする”、“ビーチボールを叩いたように感じる”、“意外に風とは感じず、物にあたっている感じがする”、“自由な姿勢で叩ける”、“装置と接触していないので、壊してしまう心配がなく安心して使える”、などの回答を得た。本方式の特徴を明らかにするために、今後さらに他の力覚提示方式との比較を行うことで、詳しく評価を行っていく必要がある。

5. 力覚表現の検討

実装したシステムより、提示された衝突感覚を、さらに豊かにするための方法を検討する。

5.1 現実の衝突力

まず、現実の物体の衝突力を、風圧による提示で模倣することを検討した。物体が衝突したときの衝突力を調べるために、実際の衝突時の力の加わり方を計測した。計測装置としては、非常に短い衝突時間に対応可能な高いサンプリング周期の荷重センサ(定格容量 10 kg)を用いた荷重計を使用した。

この荷重計を用いて、サンプリングレート 2 kHz で荷重計測を行った。衝突させる物体は、風圧から受ける提示感覚がやわらかい衝突感であったため、今回は柔らかいまたは弾力性のあるものを選んだ。以下の 3 つの同程度の質量の物を、それぞれ続けて示す高さから、荷重計に落とすことで衝突させ計測を行った。

- 硬球テニスボール (58.1 g): 約 40 cm, 50 cm
- やわらかいゴムボール (59.9 g): 約 1 m
- むいぐるみ (46.8 g): 約 1 m

なお、硬球テニスボールの高さが異なるのは、上記以上の高さから落とすと定格容量を超えた荷重がかかり、計測できなかったためである。

表 1 は衝突力(荷重を時間で積分した値: $\sum F \cdot \Delta t$)と、衝突時間を記したものであり、図 10 はそれぞれ計測した荷重の時間変化を表したものである。

表 1 や図 10 より、衝突した物質が異なると、衝突したときの力のかかり方(衝突力や衝突時間)が異なることが分かる。衝突を受けるときの力覚の違いは、このような力のかかり方の違いに起因しているものと考えられる。

表 1 現実物体の衝突力
Table 1 Actual impacts.

| | 衝突力 [kg·msec] | 衝突時間 [msec] |
|-----------------|------------------|----------------|
| 硬球ボール (40 cm) | 25.95 | 8 |
| 硬球ボール (50 cm) | 29.81 | 9 |
| ゴムボール | 32.105 | 30 |
| ぬいぐるみ | 14.05 | 10 |

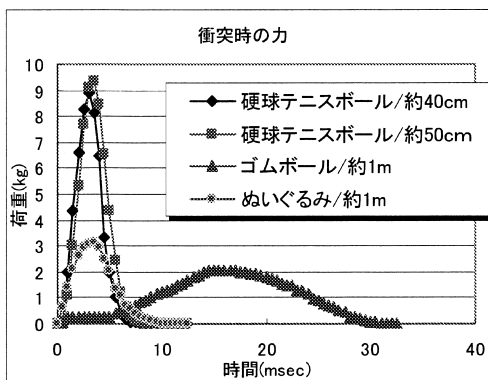


図 10 現実物体の衝突時の荷重変化
Fig. 10 A change of impacts.

5.2 風圧による衝突力

次に、風圧から受ける力を計測した。それぞれ噴出している時間を 50 msec, 100 msec, 300 msec で指定し噴出させた。計測装置は定格容量 500 g の荷重計を用いた。送風装置は、実装システムで使用したエアポンプを使用している。計測結果を図 11 に示す。

図 11 より、指定した提示時間に応じて、ある程度は噴出時間を制御可能であることが分かる。風圧出力信号に続いて、遅延の後に荷重がかかり始める。この遅延は 70 ~ 130 msec 程度の範囲でばらつきがある。おおむね 40 msec 程度で、最大荷重近くまで急速に上がり、その後徐々に上がっていく。これより、ここで用いた装置では提示されるまでに時間がかかり、瞬時の提示は困難であることが分かる。なお、提示始まりまでのばらつきは、エアポンプを制御する電源とエアポンプ自体の立ち上がりの遅さが原因と考えられる。この改善のために、チョッパ方式の電源制御を用いる方法や、立ち上がりの速いコンプレッサ方式の送風装置の利用を検討している。

5.3 仮想空間における力覚提示のタイミング

本方式は仮想空間の衝突映像と同期して、利用者に力覚を提示することを前提としているため、位置検出装置と仮想表示装置をあわせた仮想環境で利用した場合に利用者が感じる感覚を検討する必要がある。そこ

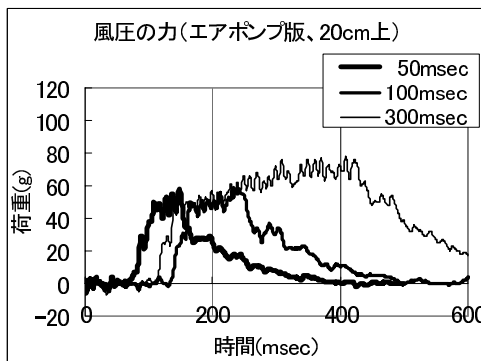
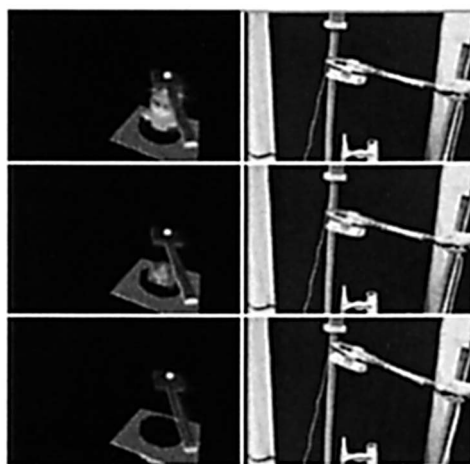


図 11 風圧による力の計測
Fig. 11 Air pressure.



上：仮想物体衝突 (1 フレーム以内)
中：4 フレーム後(約 130msec)風圧提示
下：さらに 4 フレーム後(約 130msec)風圧提示終了

図 12 仮想空間と現実空間
Fig. 12 Virtual and real world.

で、仮想空間の映像に対する力覚提示のタイミングを調べることにした。実装システムの仮想空間と現実空間を同時に映像として取り込み、両空間のタイミングを計測した。図 12 は、力覚提示を受けるときの、仮想空間と現実空間双方の映像である。

図 12 でも、図 11 で示した提示のずれがみられる。図 12 により利用者が仮想空間で仮想物体の衝突をみた後、現実空間では約 130 msec 遅れて風圧が提示されラケットがしなり始め、さらに約 130 msec の間、力が加わっていることが分かった。同様の計測を数回行ったが、おおむね同様の結果を得た。

また使用感に関するヒヤリングでは、提示タイミングのずれを感じたという報告はまったく受けず、やわらかい衝突感覚であったという報告を多く受けた。

5.4 力覚表現の検討

現実の物体の衝突力を，風圧による提示で模倣することを検討するため，図 10 と図 11 を比較する．現実の衝突力と風による提示力の間には，提示力の変化や最大値，提示時間に大きな差がある．そのため，現システムのエアポンプを使用する場合は，風圧を使用して，現実の衝突と同じ力を提示することは難しい．しかし，風圧を使って異なる種類の衝突感覚を表現できれば，仮想空間において多様な種類の衝突感覚を利用者に感じさせることが可能となり，風による豊かな力覚表現が実現すると考えた．そこで今回は，風圧により異なる衝突感覚を表現することを考える．

図 12 では「やわらかい衝突感覚」というヒアリング回答があった．ここで存在した 130 msec の提示時間や，130 msec の提示タイミングの遅れなどに着目し，これらの提示時間や提示タイミングの遅れが利用者が感じる衝突感覚に何らかの影響を与えているという仮説の下に，以下のようなアプローチを検討している．

アプローチ 1：提示時間の制御による検討

図 10 より現実の衝突時の荷重変化をみると，硬い物体の衝突に対して柔らかい物体の衝突は衝突時間が長いことが分かる．現実の衝突時間は非常に短く，そのような短い時間制御で風圧による力を提示することは困難であるが，図 12 で示したように，130 msec の長さの提示時間でも利用者には衝突感覚と感じられる．この場合の提示感覚は「やわらかい」感覚であった．この観察に基づき，衝突時間の短さが利用者が感じる硬さの感覚に影響しているとする，提示時間を短くすることで異なる（硬い）感覚を表現できる可能性が考えられる．

アプローチ 2：タイミング制御による検討

図 10 の現実の衝突力をみると，やわらかいゴムボールは，硬い硬球テニスボールに比べ，立ち上がりが遅く，荷重変化を表した山のピーク位置が後にずれていることが分かる．このような衝突時に力が加わるタイミングの違いが利用者が感じる硬さの感覚に影響していると仮定すると，仮想衝突の映像のタイミングに対して，力を提示するタイミングを変化させることで，異なる（硬い）感覚を表現できる可能性が考えられる．そこで，提示遅れなどを考慮した衝突タイミングの予測を行い，衝突する映像に対する力の提示タイミングを変化させることで，衝突感覚の硬さを表現する方法を実現するために，風圧出力のタイミングと利用者が受ける衝突感覚の間の関係について評価実験を進めていく予定である．

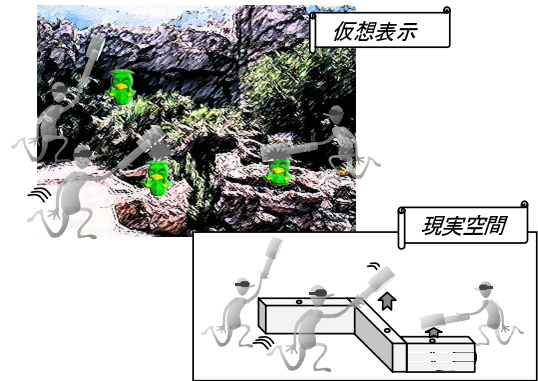


図 13 多人数共有の適用例

Fig. 13 Example of multiplayer application.

6. 今後のアプリケーションの発展

今回実装したアプリケーションは，提示位置が 1 カ所であったが，複数に拡張し多人数に対応したアプリケーションに発展させることが考えられる．具体的なアプリケーションの 1 つとして，ハンマーを持った複数の利用者が，自由に動き回り，複数のカップを叩いていくアプリケーションが考えられる（図 13）．

無拘束なインタフェースを実現するために，位置計測方法と画像表示方法にも無拘束な装置を用いる．位置計測方法としては，風受容器を取り付けたラケットにマーカをつけ，それをビデオカメラで撮影して画像処理により位置を計測する装置を用いる¹⁵⁾．表示方法としては，HMD の代わりに投影型の立体表示装置を使用する．位置計測，表示，力覚提示のすべてを無拘束なインタフェースで実現することで，ラケットを持つ利用者は，固定の装置と線でつながることがなく，場内を自由に歩き回ることができる．このような，力覚提示付の表示装置を，場内の複数箇所に設置する．利用者は，場内を歩き回り，カップが表示されている装置の前に行き，表示にあわせてカップを叩く．装置は，領域に入ったラケットの位置を計測して，仮想空間でのカップとラケットの接触に合わせて風を噴出することで，利用者に接触感を提示する．このシステムでは，無拘束なインタフェースを用いることで，各送風装置を特定の利用者に割り当てる必要がなく，複数の送風装置を，複数の利用者で共有することができるため，多人数で利用するシステムへの拡張が容易になると考えられる．

ここまでは主として，ノズルを上に向け下方向からの衝突感覚を与えるカップたたきを中心に述べたが，

1 つの送風装置を同時に利用するのは 1 人．

たとえばノズルを横向きに設置して、横方向への物体との衝突感覚を提示することにより、テニスやゴルフなどのアミューズメント分野への適用も検討している。さらにノズルの数を増やしてマトリクス状に配置し、各ノズルからの噴出空気を制御することで、面の存在や形状を表現することを次に取り組み課題として考えている。そのような面の表現を可能とすることで、地形の表現などへの応用も可能となり、用途が広がると考えている。

7. おわりに

本稿では、無拘束を目指したインタフェースとして、風圧による力覚提示方式について述べ、システムの実装、および風圧による豊かな力覚表現の検討について述べた。また、本方式の発展として具体的なアプリケーションを紹介し、多人数への拡張が可能であることを示した。以上より、本方式によって無拘束インタフェースの実現の基盤を示した。

我々の最終目標は入出力すべてが無拘束なシステムである。その中で、本方式は無拘束性の実現が最も難しいと思われる力覚提示について検討したものである。真に無拘束なシステムを実現するためには、表示方法や位置検出方法についても検討が必要である。これら個別の技術の開発とそれらを組み合わせたシステムの開発を通して、より無拘束性の高いインタフェース技術を実現していきたい。また、今回は1軸での力覚提示について述べているが、2軸に拡張していくなど、柔軟な提示位置を実現するための検討も行っていきたいと考えている。これらの無拘束な道具の実現によって、家庭の中にその道具が入り、広く一般の日常生活においても利用できるようになることを期待している。

参 考 文 献

- 1) 神沼充伸：逆フィルタを用いて広い領域を制御する音場再現システムに関する研究，NAIST-IS-DT9761204 (Mar. 2001).
- 2) Cruz-Neira, C., Sandin, D.J. and Defanti, T.A.: Surround-Screen Projection-Based Virtual Reality: The Design and Implementation of the CAVE, *Proc. SIGGRAPH'93*, pp.135-142 (1993).
- 3) 廣瀬通孝, 小木哲朗, 石綿昌平, 山田俊郎：多面型全天周ディスプレイ (CABIN) の開発とその特性評価, 電子情報通信学会 D-II, Vol. J81-D-II, No.5, pp.888-896 (1998).
- 4) 濱岸五郎, 甲谷 忍, 坂田政弘, 山下敦弘, 増谷 健, 井上益孝：イメージスプリッタ方式メカネなし 3D ディスプレイ, 映像情報メディア学会

誌, Vol.51, No.7, pp.1070-1078 (1997).

- 5) 猪口和隆, 能瀬博康, 森島英樹, 谷口尚郷, 松村進：広い垂直視域を有するめがねなし 3D ディスプレイ, 3次元画像カンファレンス'98, pp.28-33 (1998).
- 6) Massie, T.H. and Salisbury, J.K.: The PHAN-ToM Haptic Interface: A Device for Probing Virtual Objects, *Proc. ASME Winter Annual Meeting, Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, Chicago, IL (Nov. 1994).
- 7) Brooks Jr., F.P., Ouh-Young, M., Batter, J.J. and Kilpatrick, P.J.: Project GROPE — Haptic Displays for Scientific Visualization, *Proc. ACM SIGGRAPH '90*, pp.177-185 (1990).
- 8) 佐藤 誠, 平田幸広, 河原田弘：空間インタフェース装置 SPIDAR の提案, 信学会論文誌 D-II, j749-D-II(7), pp.887-894 (1991).
- 9) 廣瀬通孝, 小木哲朗, 矢野博明, 箕 直之, 中垣好之：ワイヤーテンションを用いたウェアラブルフォースディスプレイの開発, 日本 VR 学会大会論文集, Vol.3, pp.1-4 (1998).
- 10) CyberGrasp. <http://www.virtex.com/>
- 11) Gomez, D., Burdea, G. and Langrana, N.: Integration of the Rutgers Master II in a Virtual Reality Simulation, *Proc. IEEE VRAIS'95 Conference*, Research Triangle Park, NC, March, pp.198-202 (1995).
- 12) 鈴木由里子, 河野隆志, 石橋 聡：仮想空間における風圧による力覚提示, VR 学研報, Vol.4, No.1, CSVC99-20, pp.37-42 (Oct. 1999).
- 13) 小木哲朗, 廣瀬通孝：風覚ディスプレイによるデータの提示, *Progress in Human Interface*, Vol.2, No.1, pp.13-18 (1993).
- 14) 生井武文：流れの力学, pp.70-71, コロナ社 (1976).
- 15) QuickMAG. <http://www.okk-inc.co.jp>

(平成 14 年 4 月 2 日受付)

(平成 14 年 10 月 7 日採録)



鈴木由里子 (正会員)

1993年三重大学工学部情報工学科卒業。1995年同大学大学院修士課程修了。同年日本電信電話(株)入社。サイバースペースにおけるコミュニケーション環境の研究開発、特に力覚インタフェース等のヒューマンインタフェースの研究に従事。現在、NTTサイバースペース研究所勤務。ACM 会員。



小林 稔(正会員)

1988年慶應義塾大学理工学部計測工学科卒業。1990年同大学大学院修士課程修了。同年日本電信電話(株)入社。1996年マサチューセッツ工科大学大学院修士課程修了。主に、CSCW、ヒューマンインタフェースの研究に従事。現在、NTTサイバースペース研究所主任研究員。博士(工学)。ACM, IEEE Computer Society, 電子情報通信学会, 日本バーチャルリアリティ学会各会員。



石橋 聡

1980年徳島大学工学部情報工学科卒業。1982年同大学大学院修士課程修了。同年日本電信電話公社入社電気通信研究所入所。動画像符号化および映像通信システムの研究開発に従事。現在、NTTサイバースペース研究所主幹研究員。博士(工学)。IEEE, 電子情報通信学会, 映像情報メディア学会, 日本バーチャルリアリティ学会各会員。